

L'UTILISATION DES SATELLITES METEOROLOGIQUES POUR L'ESTIMATION DE LA PLUIE EN ZONE SAHELO-SOUDANIENNE AU CENTRE DE METEOROLOGIE SPATIALE DE LANNION

Bernard GUILLOT

L'estimation des pluies par télédétection a fait l'objet de recherches déjà anciennes. Au niveau national un réseau a été institué en 1984, dont la coordination m'a été confiée. Ce réseau regroupe sous le sigle EPSAT : Estimation des Pluies par SATEllite en zone sahélo-soudanienne, des chercheurs de divers organismes : ORSTOM, CNRS, universités, autour d'un projet et d'expériences menées en commun. Depuis peu une équipe anglaise de l'université de Reading est associée à nos travaux.

L'objectif des recherches conduites à Lannion, par l'antenne ORSTOM et des météorologues du centre, est d'explorer les possibilités d'estimation des précipitations, à tous les niveaux de l'échelle spatiotemporelle et en temps quasi réel. Nous utilisons pour cela l'imagerie du satellite météo-sat et les données de terrain : pluviométrie, humidité et température de l'air, issues des stations d'observation. La zone d'étude comprend les pays du Sahel (du Sénégal au Tchad) regroupés au sein du Comité Inter états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS).

I. PRINCIPES GENERAUX DE LA TELEDETECTION PAR SATELLITES. ADAPTATION AU PROBLEME DE L'ESTIMATION DES PRECIPITATIONS

La télédétection par satellite utilise les propriétés du rayonnement électromagnétique, et de son comportement dans l'atmosphère aux différentes longueurs d'onde ; les parties adéquates du spectre qui est "l'ensemble continu des ondes électromagnétiques classées dans l'ordre de leurs fréquences... ou de leurs longueurs d'ondes dans le vide" (Mathieu et al, 1983) déterminent le choix des capteurs embarqués à bord des satellites météorologiques. Ce sont pour l'instant des capteurs "passifs", des radiomètres, qui mesurent le rayonnement émis par la surface, ou par les différentes couches de l'atmosphère.

Pour la détection des pluies les microondes apportent une information sur les précipitations par l'effet d'absorption, par les gouttes d'eau, du

rayonnement émis par la surface. Cette mesure "physique" serait aussi possible par un capteur "actif" (radar) qui recueillerait le renvoi (réflectance) par les gouttes d'un rayonnement émis par une source artificielle. Ces méthodes ne sont actuellement pas applicables en routine, du fait de la faible résolution spatiale (109 km au sous-point) des mesures faites par les capteurs passifs placés actuellement à bord des satellites ; il n'existe par ailleurs pas de radar embarqué. Nous verrons cependant qu'il est possible d'utiliser, à titre de complément, ou de validation, les données des radars météorologiques au sol, installés dans les grands aéroports en Afrique.

Les capteurs que l'on utilise actuellement sont ceux qui reçoivent les rayonnements visible et infrarouge. Le maximum d'énergie rayonné par le soleil, qui est une source chaude à environ 6000°C, se situe dans les longueurs d'onde du "visible", entre 0,4 et 0,7 μm , (celles que l'oeil intercepte) ; cette bande spectrale, et le proche infrarouge (de 0,7 à 1,1 μm), correspondent à une "fenêtre" atmosphérique, où l'atmosphère est presque transparente au rayonnement, qui constitue le canal visible de Météosat, qui enregistre ainsi une part de l'énergie solaire réfléchi par la terre. La terre est une source moins chaude, qui rayonne dans des longueurs d'onde plus grandes, dans l'infrarouge moyen et l'infrarouge thermique. Le canal "vapeur d'eau", centré autour de 6,3 μm , reçoit une énergie émise par la haute atmosphère et le canal infrarouge thermique le rayonnement issu du sol ou des nuages, dans une fenêtre (10,5 - 12,5 μm) où la transparence atmosphérique, quoique bonne, n'est pas totale.

L'estimation des pluies que nous faisons à Lannion à partir de ces données est indirecte et relève de méthodes statistiques. La précipitation est en principe liée à la présence de nuages particuliers, repérables sur les images, et dont on peut par exemple établir des fréquences d'apparition ; par son impact thermique la pluie a également un effet sur la température de la surface du sol. Ces paramètres : fréquences de nuages et température du sol se sont révélés au fil du temps assez bien corrélés avec les données des stations . On y ajoute un effet correcteur lié à l'environnement physique des nuages ; ceux-ci sont en effet plus ou moins efficaces suivant la température ou la sécheresse de l'air, par une plus ou moins grande évaporation des gouttes. Pour tenir compte de cette influence nous avons choisi, en première approche, d'introduire comme élément correcteur la latitude, le climat se dégradant de façon assez régulière du sud au nord dans la zone sahélo-soudanaise.

II. CALCUL DE FREQUENCES DES NUAGES PLUVIOGENES

L'utilisation simultanée des canaux visible et infrarouge thermique permet aux spécialistes de distinguer des types de nuages, par une comparaison des réponses radiométriques. Ainsi un nuage d'orage à grand développement vertical (cumulonimbus) se distingue, par son sommet très froid et par sa forte brillance "visible", d'un stratus bas, très dense, donc brillant, mais chaud. L'utilisation de ce type d'analyse permet une cartographie des genres nuageux.

Il est donc possible par ce moyen d'isoler les nuages précipitants, notamment les cumulonimbus, responsables de la plus grande partie des pluies au Sahel et d'en établir une statistique. Divers obstacles empêchent cependant de procéder de la sorte, les principaux étant la variabilité diurne extrêmement rapide de ces nuages et leur grande abondance en soirée et de

nuit, à un moment où la donnée visible fait défaut. Après diverses tentatives et de nombreux tests nous avons constaté que nous pouvions discriminer de façon satisfaisante, dans l'infrarouge, les nuages pluvioigènes (cumulonimbus), à sommet froid, des autres nuages (cirrus) en utilisant des seuils de température, dans une fourchette comprise entre -35 et -45°C . Nous avons opté pour une valeur intermédiaire, à -40°C et nous établissons à partir de ce seuil un comptage des nuages, sous la forme 0-1 (absence-présence), sur chaque point des images successivement analysées. Les valeurs obtenues sont rangées dans un fichier dit d'occurrences de nuages à sommet froid (Oc). Celui-ci est une matrice constituée de 1024 lignes Météosat (entre 25° nord et 17° sud) et de 2048 points (entre 50° est et 50° ouest).

Les résultats sont théoriquement disponibles à tout moment, au gré de l'opérateur. Nous avons traité six images par jour en 1986 et 1987 et 24 images par jour depuis mars 1988. Nous créons par ce moyen une statistique de nuages à l'échelle du pixel infrarouge Météosat ($4,4 \times 4,4 \text{ km}$ au point sous satellite), pour des périodes de temps qui vont de 5 à 10 jours ("pentades" et "décades") au mois et à la saison des pluies (mai-octobre) (fig. 1).

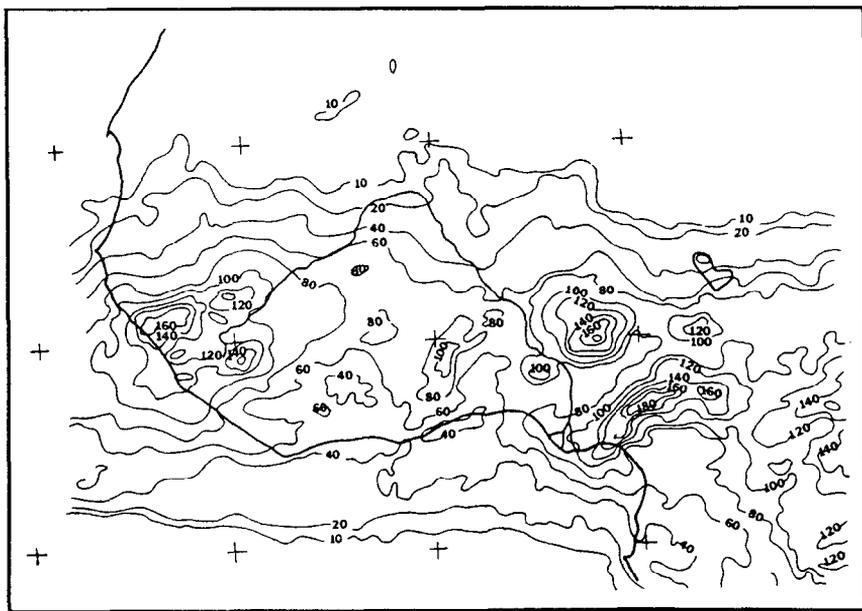


Figure 1 - Champ d'occurrences de nuages à sommet froid, 01 mai- 31 octobre 1986

III. TEMPERATURE DU SOL

Le canal infrarouge thermique permet d'obtenir une température, par la conversion du signal d'énergie reçu par le radiomètre. Cette mesure intègre l'émission infrarouge de la surface (sol ou nuages) et le solde absorption-émission des constituants de l'atmosphère : CO_2 , vapeur d'eau, aérosols. Nous l'utilisons pour l'instant telle quelle, sans les corrections appropriées qui permettraient de restituer la température de la surface et d'éliminer les effets atmosphériques.

Les nuages, opaques au rayonnement infrarouge, font écran entre le sol et le satellite et doivent être écartés. Ceci est réalisé par une sélection dans les valeurs enregistrées par le radiomètre, sur les images successives et sur une période de temps assez longue pour que les portions de ciel clair, ajoutées bout bout, aboutissent à une décontamination aussi complète que possible. La procédure utilisée, dite "température maximale" (Tmax), s'appuie sur le fait que les nuages sont généralement plus froids que la surface du sol et elle revient à créer une synthèse des températures les plus élevées enregistrées en chaque point.

Nous élaborons ainsi un fichier composé de 2048 lignes et 2048 colonnes, soit entre 55° nord et 50° sud et 50° est et 50° ouest, sur une base pentadaire (périodes de cinq jours). Des moyennes sont ensuite calculées par décade, par mois et pour la saison (fig.2).

L'idée d'utiliser la température du sol mesurée par Météosat pour l'estimation de la pluie a été lancée par des agronomes, qui ont montré (Assad, 1987, Imbernon et al, 1986) que celle-ci était en relation étroite avec la pluviométrie, avec des coefficients de corrélation variables mais toujours élevés.

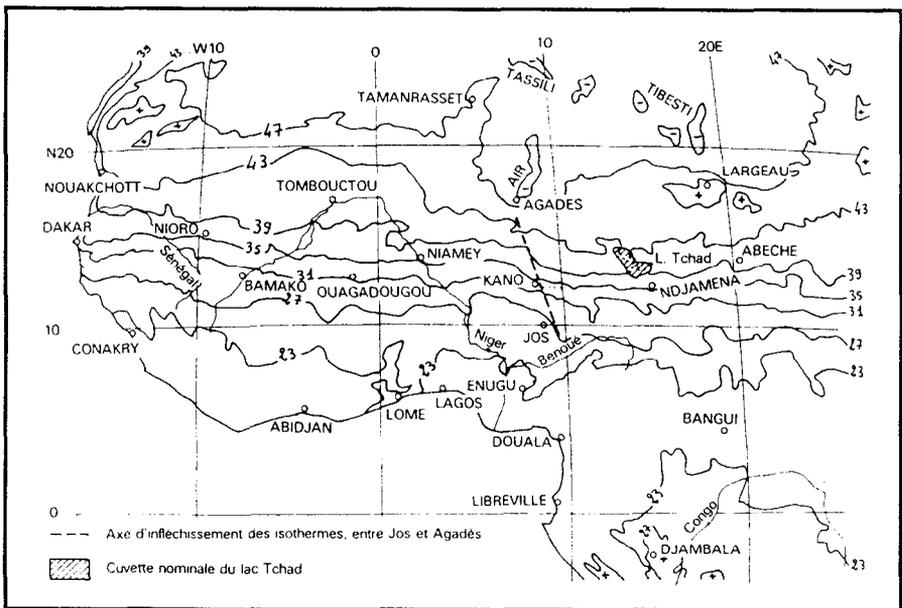


Figure 2 - Moyenne des températures maximales Meteostat, de mai à septembre 1987. Isothermes de 4° en 4°C.

IV. CALCUL DE L'ESTIMATION DES PRECIPITATIONS : PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE DES NUAGES

Les paramètres ainsi extraits de l'information satellitaire : Occurrences de nuages (Oc) et Température maximale de brillance (Tmax) ne sont pas utilisés directement. Ils sont d'abord confrontés aux données pluviométriques du moment issues des stations synoptiques du réseau météorologique et on en tire une relation qui fournit les coefficients de l'estimation. Les premiers essais ont été satisfaisants mais ils ont révélé

rapidement un biais systématique dans les résultats, qui nous conduisait à sous-estimer les précipitations au sud et à les surestimer au nord. Ce biais est à mettre au compte de l'environnement physique des nuages, qui conditionne leur efficacité. Celle-ci peut être mesurée par une méthode simple, qui consiste à rapporter les hauteurs d'eau reçues dans les stations du réseau météorologique aux occurrences de nuages observées. On obtient ainsi des isocontours, en millimètres de pluie par nuage (fig.3), qui montrent une forte variation, du sud au nord, en liaison avec une dégradation concomitante des principaux facteurs atmosphériques de l'environnement climatique.

Des recherches ont par exemple montré qu'une part importante de l'eau précipitée est évaporée lors de son parcours atmosphérique vers le sol et ce d'autant plus que l'air est plus chaud et plus sec.

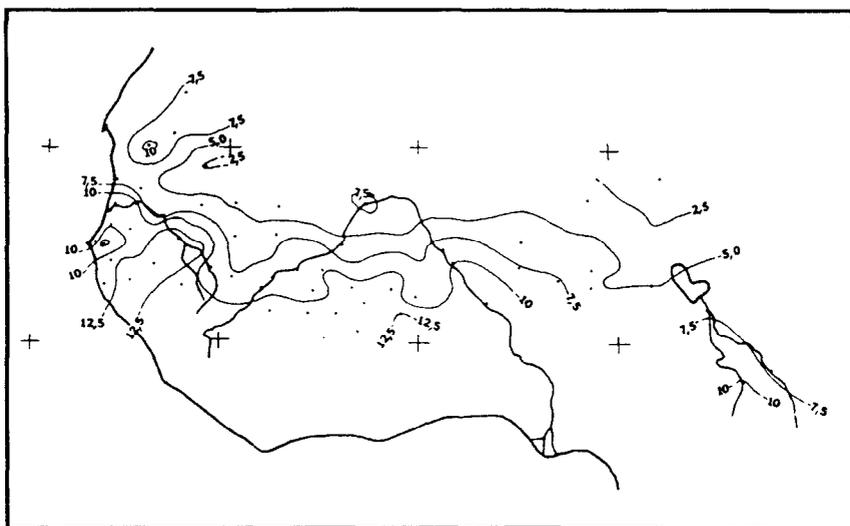


Figure 3- Rapport pluviométrie-occurrences de nuages à sommet froid (Pcb), 01 mai-31 octobre 1986.

Faute de posséder de bonnes mesures de la température et de l'humidité de l'air et comme l'orientation principale du champ d'efficacité des nuages est principalement zonale nous avons décidé, en première approximation, d'apporter à nos estimations un élément correcteur aisément quantifiable, la latitude.

Une formule pour l'estimation de la pluie a ainsi été établie, sous la forme d'une régression multiple à quatre variables : une variable expliquée, la pluie et trois variables explicatives : les nuages pluvioènes (Oc), la température maximale (Tmax) et la latitude (Lat), dont l'équation s'écrit comme suit :

$$Pe \text{ (Pluie estimée)} = a.Oc + b.Tmax + c.Lat + d$$

Les coefficients de corrélation que l'on a obtenus en 1987 ont été respectivement de 0,69, 0,85, 0,84, 0,81 et 0,86 pour les mois de mai septembre. Les résultats cumulés ont été de 0,88 pour la période du premier mai au 30 juin, 0,90 de mai à juillet et 0,93 de mai à septembre.

En utilisant la formule énoncée ci-dessus nous avons construit une image du champ pluviométrique ainsi estimé, pour la période mai-septembre 1987 (fig.4). Les calculs d'erreur montrent que notre estimation est bonne dans toute la partie méridionale de la zone d'étude, avec des écarts voisins de 10%.

Les résultats restent mauvais au nord, ce qui paraît normal étant donné la rareté des épisodes pluvieux.

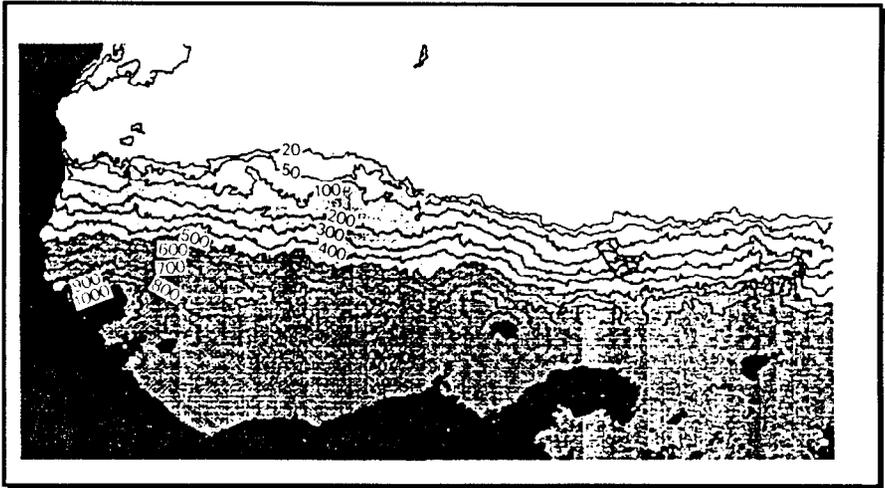


Figure 4- Carte pluviométrique de synthèse établie à partir de la formule : P_e (Pluie estimée) = $3.34 Oc - 4.8 T_{max} - 22.1 Lat + 403$. Isohyètes exprimées en mm.

V. APPLICATIONS ET PERSPECTIVES

Dès les débuts de ce travail nous nous sommes efforcés de nouer les contacts les plus étroits possibles avec les responsables des réseaux d'observation au sol, nationaux et régionaux et avec les agrométéorologues, qui sont à la fois fournisseurs de données de première main et utilisateurs des produits issus de l'observation satellitaire. Nous nous sommes en outre attachés à réunir autour du projet les chercheurs qui disposaient des compétences et des outils propres à nous permettre d'améliorer nos résultats, dans le cadre du réseau EPSAT.

Les relations avec les responsables des réseaux sol et les services agrométéorologiques ont pris la forme d'un échange systématique d'informations. Au centre Agrhymet de Niamey, qui est la cellule opérationnelle régionale du CILSS, nous envoyons depuis 1985 des renseignements d'ordre qualitatif, sous la forme de cartes de température maximale et d'occurrences de nuages à sommet froid, cartes qui sont prises en compte dans la structure opérationnelle de surveillance de l'installation et du déroulement de la saison des pluies. Nous recevons en retour des données de pluviométrie. Le même réseau d'échange fonctionne avec les services météorologiques nationaux, où sont installées des cellules nationales Agrhymet.

Par l'intermédiaire du laboratoire UTIS (Unité de Traitement de l'Information Satellitaire) du Centre de Recherches Océanographiques de Dakar nous obtenons également les données issues du réseau de l'ASECNA, qui regroupe les états d'Afrique de l'ouest et d'Afrique centrale. Nous envoyons également à UTIS des données satellitaires qui sont utilisées sur place, depuis deux ans, pour l'estimation des pluies au Sénégal.

Cette collaboration étroite devrait prendre prochainement un tour nouveau avec la création, par nos soins, d'un outil de traitement des données satellitaires et du réseau sol, qui irait de l'acquisition des données à l'élaboration de cartes de pluie estimée. Ces stations "clés en mains", peu coûteuses, pourraient être installées assez rapidement sur place, dans les centres de collecte de l'information utilisateurs des produits ainsi élaborés. Les procédures utilisées seront dérivées en partie des composantes du logiciel TRISKEL mis en place pour les besoins de nos programmes de recherche (Dagorne, 1988).

Nos travaux pourraient alors être davantage orientés vers l'amélioration de nos méthodes. Celles-ci sont encore bien imparfaites. La figure 1 montre par exemple que les isolignes d'efficacité des nuages ne sont pas tout à fait zonales et que la partie occidentale du champ est d'orientation franchement méridienne. De même la distribution spatiale des erreurs liées à l'estimation révèle une sous-estimation systématique des pluies dans certaines zones (sud du Sénégal) et une surestimation ailleurs (région du lac Tchad). Un effort doit donc être fait pour prendre en compte ces phénomènes, afin d'aboutir à un découpage spatial raisonné, par l'introduction de paramètres reflétant les variations locales de l'environnement des nuages. Cela se traduit autant sur leur fréquence (GUILLOT-CARN, 1988) que sur leur efficacité (MOREL, 1988).

Ces efforts vont s'inscrire dans le cadre du réseau EPSAT. Les principales conclusions de la dernière réunion, qui s'est tenue à Reading en octobre 1988, ont été :

- que les méthodes statistiques d'estimation de la pluie ne peuvent, dans leur état actuel, fournir des résultats exploitables à une échelle spatiale réduite (pixels ou groupes de pixels Météosat), qu'aux niveaux mensuel et saisonnier ;
- que le contrôle des résultats par les mesures au sol devrait être vérifié par d'autres instruments, pour permettre de situer les limites de validité de l'extrapolation d'une mesure de surface (pluviomètres et pluviographes) très limitée (mesurée en centimètres carrés), à l'aire beaucoup plus étendue qui est celle du pixel Météosat (20 km²). Ces instruments existent, sous la forme de radars météorologiques, calibrés par un réseau serré de pluviographes. Au réseau de pluviographes déjà installé dans ce but au Niger, par l'ORSTOM et la Météorologie Nationale du Niger, devrait être adjointe en 1989 une chaîne de numérisation du radar de Niamey ;
- qu'il convient de continuer la recherche d'algorithmes plus performants que ceux que nous utilisons actuellement pour la discrimination des types de nuages, avec une utilisation simultanée, pendant la journée des canaux visible et infrarouge, et de nuit des canaux vapeur d'eau et infrarouge ;
- la nécessité d'obtenir une mesure des paramètres atmosphériques à une échelle proche de celle de Météosat, par l'utilisation de sondes verticales du type de ceux qui sont actuellement embarqués sur les satellites NOAA, dont une version allégée est programmée sur les futurs satellites Météosat.

BIBLIOGRAPHIE

- ADLER R.F., NEGRI A.J., 1981. - A simple physical basis for relating geosynchronous satellite infrared observations to thunderstorm rainfall. 4th Conf. on Hydromet., Oct. 79, Reno, Nevada, 121-128.
- ARKIN P.A., 1983. - A diagnostic precipitation index from infrared satellite imagery. Trop. Oc. Atm. Newsletter, 5-7.
- ASSAD E., 1987. - Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agro-climatique des cultures en zone sahéenne. Cas du Sénégal. Thèse, Univ. du Languedoc, Montpellier, 258 p.
- BARRET E.C., MARTIN D.W., 1981. - The use of satellite data in rainfall monitoring. Academic Press., 340 p.
- BELLE C B., 1986. - Composition colorée d'une sectorisation de l'image plein disque de Météosat II du 21 septembre 1986, 13H00 TU. Veille Climatique Satellitaire, 15, pp. 34-37.
- CARN M., DAGORNE D., GUILLOT B., LAHUEC J.P., 1988. - Rainfall estimation over the Sahel from infrared satellite imagery, during the rainy season 1986-1987. Proceeding of the seventh Meteosat Scientific Users, Madrid, 4 p.
- CARN M., LAHUEC J.P., 1987. - Estimation des précipitations au Niger au cours de la saison des pluies 1986 à partir de l'infrarouge Météosat. Bilan et critique des méthodes utilisées. Veille Climatique Satellitaire, 17, pp. 40-48.
- DAGORNE D., 1988. - Traitement des données satellitaires à l'antenne ORSTOM de Lannion. Le logiciel TRISKEL. Veille Climatique Satellitaire, 23, pp. 17-22, et 24, pp. 38-42.
- GRIFFITH C.G. et al., 1978. - Rain estimation from geosynchronous satellite imagery. Visible and infrared studies. Mon. Wea. Rev., 106, 1153-1171.
- GUILLOT B., BELLE C B., LAHUEC J.P., 1987. - Convection intertropicale et pluviométrie. Essai de mise en relation pour l'Afrique de l'ouest, du 11 mai au 20 août 1985. Adv. Space Res., vol. 7, 3, pp. (3)-59 - (3)66.
- GUILLOT B., CARN M., 1988. - Le rôle des facteurs locaux dans la convection profonde en Afrique occidentale. Une analyse à partir de l'imagerie infrarouge du satellite Météosat. Veille Climatique Satellitaire, 21, pp. 33-48.
- GUILLOT B., 1981. - Les satellites de l'environnement. Description sommaire de la série TIROS-N/NOAA-A.I. ORSTOM, Initiations Documentations Techniques, 50, Télé-détection 5, 58 p.
- IMBERNON J., ASSAD E., GUILLOT B., DAGORNE D., 1987., - Evaluation de la pluviométrie par cumul des images infrarouge thermique de Météosat (Sénégal). Veille Climatique Satellitaire, 16, pp. 49- 58.
- LEBORGNE P., 1981. - Détermination des zones de précipitations sur l'océan par radiométrie hyperfréquence. La Météorologie, VI, 25, pp. 13-24.
- MATHIEU J.P., KASTLER A., FLÉURY P., 1983. - Dictionnaire de physique. Masson éd., Eyrolles, 568 p.
- MOREL R., 1988. - Remarques à propos de l'effet des facteurs locaux sur la baisse de pluviométrie observée en Afrique de l'ouest sur le Sahel. Veille Climatique Satellitaire, 23, pp. 23- 28.
- SOLOMON S.I., PIETRONIRO A., WISHART N., PIEYNS S., GUILLOT B., CARN M., 1988. - Application de la télé-détection à l'évaluation des ressources en eau du Sahel. Veille Climatique Satellitaire, 24, pp. 26-37.